

文章编号: 2095-4980(2020)03-0422-05

宽频带宽扫描角多极化相控阵天线设计

贺友龙¹, 梁洪灿^{*1}, 赵呈昊¹, 沈千朝², 水孝忠¹

(1.中国电子科技集团公司 第五十一研究所, 上海 201802; 2.上海航天电子技术研究所, 上海 201109)

摘要: 为更有效地探测各类目标, 设计了一种小型化宽带双极化天线。工作频段内天线单元驻波比(VSWR) ≤ 2.5 , 单元辐射性能优良, 波束宽度能够满足阵列扫描所需的覆盖空域。根据阵列天线理论分析, 实现了阵列多极化形成与波束扫描同步。通过样机实测结果表明, 该天线在 $f_0 \sim 3f_0$ 的频段内实现了多极化, 扫描覆盖空域为方位面 $\pm 45^\circ$ 和俯仰 $\pm 20^\circ$ 。

关键词: 双极化; 小型化; 多极化阵列; 相控阵天线

中图分类号: TN821^{+.8}

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2019543

Design on wide bandwidth and scanning angle of multi-polarized phased array antenna

HE Youlong¹, LIANG Hongcan^{*1}, ZHAO Chenghao¹, SHEN Qianchao², SHUI Xiaozhong¹

(1.51st Research Institute of CETC, Shanghai 201802, China;

2.Shanghai Aerospace Electronic Technology Institute, Shanghai 201109, China)

Abstract: A compact wide-bandwidth and dual-polarized antenna is presented in order to detect different radars effectively. The antenna can achieve $VSWR \leq 2.5$ and good radiation pattern which can meet the covering airspace requirements of the phased array. By analyzing the antenna array theory, the array polarization switching and beamforming are realized simultaneously. The measured results of the array reveal that it achieves multi-polarization at bandwidth of f_0 to $3f_0$, scanning angle of $\pm 45^\circ$ in the azimuth and $\pm 20^\circ$ in the elevation. The design has laid a technical foundation for the naval vessel RF integration system.

Keywords: dual-polarized; compact; multi-polarization; phased array antenna

在现代电子战中, 雷达为了更有效地探测各类目标, 提高自身抗干扰能力, 常会采用极化变换技术使自身的极化方式发生变化。有源电扫阵列(Active Electronically Scanned Array, AESA)天线技术的出现加速了雷达多极化探测的发展, 雷达为充分发挥 AESA 体制的技术优势, 采用多极化探测变得越来越普遍。为应对这种雷达技术的发展, 作为作战的对立面, 雷达侦察干扰设备的宽频带多极化接收和发射技术理应及时跟上, 以应对极化雷达技术的发展。特别是作为舰载综合射频系统, 采用多极化技术能有效提高口径复用率、提高侦察干扰能力。

1 宽频带宽角多极化相控阵天线技术研究

1.1 双极化天线设计技术

宽频带双极化天线的设计基于“频率无关”天线理论和正交模在传播中互不干扰原理。通常采用的天线形式包括渐变槽线天线(Tapered Slot Antenna, TSA)、正弦天线、喇叭天线、对数周期天线等^[1]。这些单元既可单独使用, 也可组成宽频带全极化天线阵列使用。设计时, 应从天线尺寸、波束宽度、增益、与馈线系统的连接方式等方面进行综合考虑。

槽线天线也称为 Vivaldi 天线^[2], 是一种非周期结构连续逐渐变化的天线, 具有频带宽, 质量轻, 结构简单,

收稿日期: 2019-12-13; 修回日期: 2020-02-14

作者简介: 贺友龙(1988-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为超宽带天线、超宽带相控阵列。email:443438117@qq.com

*通信作者: 梁洪灿 email:lianghongcan@sina.com

易于加工和集成等优点。这种天线可设计为双线极化形式，除可单独使用外，还特别适合组阵使用。目前国内外已出现较多采用这种单元的双极化相控阵列^[3]，但多极化相控阵列^[4-8]国内外文献上很少见。

工作于匹配状态下的槽线，如果槽线的宽度远小于 $\lambda/2$ 时，槽线不会辐射能量，此时的槽线可作为一种低损耗的传输介质。TSA 正是利用了宽度大于 $\lambda/2$ 时槽线的特性，在此条件下，槽线可明显地辐射能量。如图 1 所示，TSA 可分为激励区、传输区和辐射区三部分。在不同的频率上，它的不同部分向外辐射或向内接收电磁波，而各个辐射部分相应的不同频率信号的波长的电长度不变。因此，理论上 TSA 具有很宽的带宽，且在工作带宽内波束宽度基本相同，表明渐变槽线天线的相位中心随频率变化。但试验表明它变化的范围较小，远不如对数周期天线明显。渐变槽线天线的辐射是端射式，电场矢量平行于介质基片。

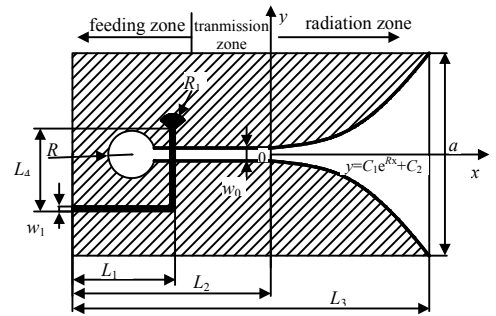


Fig.1 Schematic diagram of TSA
图 1 渐变槽线天线工作原理图

一般 TSA 的指数渐变曲线方程可表示为：

$$y=\pm(C_1e^{Rx}+C_2) \tag{1}$$

式中： R 为指数因子，决定了天线的波束宽度； x 较大时，指数曲线的截断处应该能使天线工作频带内的导波辐射出去； x 较小时，天线中导波的能量被束缚在槽线之间。天线低频段的截止波长可以确定为槽线宽度的 2 倍，而天线高频段的性能则受槽线最窄处宽度的限制。设计参数具体数值详见表 1。

为实现双极化，可采用图 2 所示的 2 片正交放置的槽线天线面实现。这要求 TSA 的馈电槽线具有足以容纳介质基片厚度的槽宽，并且 2 根馈线为了互不干涉，必须处于不同高度。

为满足宽角度扫描，双极化天线单元中单片槽线天线的口径宽度 a 应小于 43 mm，这样组阵后的单元间距可以不超过 31 mm，能较好地抑制高频段的栅瓣。因此天线单元设计的难点之一是在口径宽度 a 的约束下匹配好输入阻抗。天线设计的另一个难点是双极化天线的交叉馈电。在电磁场仿真软件 HFSS 中对双极化天线单元进行参数化建模，主要需调整的参数为短路槽直径、馈电位置、馈电微带线宽度、馈电扇形短路端半径等。天线实物模型见图 3，测试结果见图 4~图 6。

表 1 设计参数具体数值(单位: mm)

Table1 Specific values of design parameters(unit:mm)								
L_1	L_2	L_3	L_4	w_0	w_1	a	R	R_1
31.75	40.00	141.00	20.50	3.10	1.50	42.60	10.00	2.50

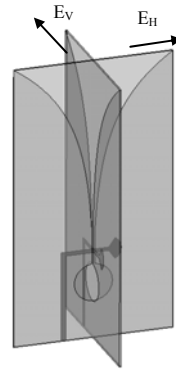


Fig.2 Illustration of dual-polarized TSA structure
图 2 双极化 TSA 结构示意图

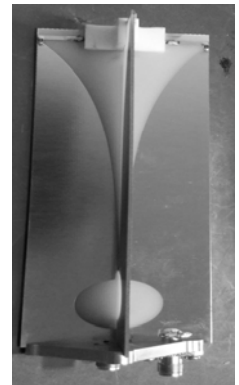


Fig.3 Picture of dual-polarized TSA
图 3 双极化槽线天线单元实物

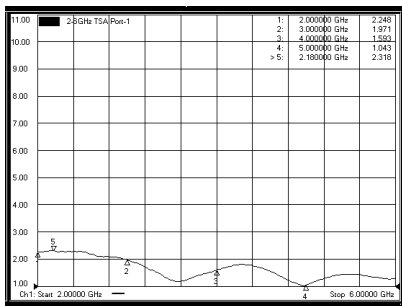


Fig.4 Measured VSWR trace of the port 1
图 4 端口 1 驻波测试曲线

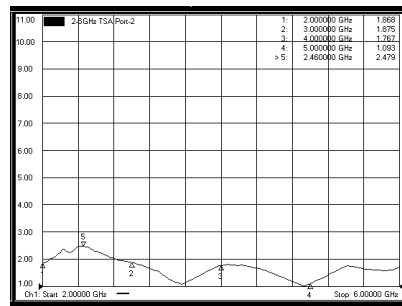


Fig.5 Measured VSWR trace of the port 2
图 5 端口 2 驻波测试曲线



Fig.6 Measured isolation from the port 1 to port 2
图 6 端口 1 和 2 隔离度测试曲线

1.2 阵列多极化形成与波束扫描同步实现技术

空间任意极化的波都可以由任意 2 个相互正交的极化基合成，通常采用线极化基(H,V)或圆极化基(L,R)。如，采用线极化基(H,V)时，当两者幅度相等、相位相差 90° 时，合成圆极化波 L 或 R。天线全极化的形成正是基于这一极化分解原理。

假设双线极化天线的两端口 1 和 2 分别产生水平和垂直 2 种线极化方式，则其多极化形成关系见表 2。

对于两端口幅度的控制，可通过可控衰减器实现，也可通过 SPDT 开关使天线的端口接匹配负载实现。

对于两端口相位的控制更容易，因为相控阵天线中每个端口后就接有移相器，全极化形成的相位关系只约束了两端口间的相对相位，对相控阵波束扫描所需的阵内相差不产生任何影响。

设原阵列为实现 θ_B 扫角所需的阵内相位差为：

$$\Delta\phi_B = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta_B \quad (2)$$

设为实现某种极化所需附加的固定相位为 ϕ_p (不修正情况下为 $0^\circ, 90^\circ, -90^\circ$ 或 180°), 则极化形成与波束扫描同步实现所需的阵内相移值为 $\Delta\phi_B + \phi_p$ 。

设计的宽频带宽角多极化相控阵天线的原理框图见图 7，采用 8 列 4 行共 32 单元。

每一天线单元接口均接移相器，同一极化状态的信号通过合路网络进行合成，最后再通过 1:2 合路器总合成。通过控制移相器，可对每一天线单元的移相状态独立控制。

天线阵面采用 32 单元双极化槽线天线，俯仰方向 4 个单元，方位方向 8 个单元，为使阵列能在方位面 $\pm 45^\circ$ 、俯仰面 $\pm 20^\circ$ 范围内扫描而不出现栅瓣，经过优化，单元间距选取为 $d_x=d_y$ ， d_x 约为 $0.6\lambda_{3f_0}$ ，排布方式见图 8。

由于双极化方式的排布，阵面结构将变得复杂，单元互耦、驻波畸点等问题可能出现，这可以通过增加金属匹配柱或增加金属化过孔等手段予以消除。

为实现天线阵的高增益和低副瓣，需要增加单元数，并采用适当的孔径加权。可通过仿真确定副瓣电平满足系统要求所需的单元数及阵列排布、加权方式等。

2 宽频带宽角多极化相控阵测试结果

以双极化槽线天线单元仿真结果为基础，依次进行小阵列仿真、样机阵列仿真和全阵仿真，逐步扩大仿真规模，分步考察天线的扫描特性、极化特性和副瓣特性，最终获得了较优的设计参数和技术指标，完成了对宽频带多极化相控阵天线原理样机电性能指标的确认，为后续的图纸设计和实物验证提供了技术保障。

以仿真模型参数为设计依据，完成天线单元、阵面、馈电网络、波控网络等的设计加工，形成宽频带多极化相控阵天线原理样机，并在微波暗室进行实物验证，阵面实物见图 9，原理样机实物见图 10。



Fig.9 Picture of the antenna array 图 9 阵面实物图



Fig.10 Picture of the elementary prototype 图 10 原理样机实物图

表 2 多极化形成幅相关系表

Table 2 Amplitude and phase relationship between port 1 and port 2 in different polarization

port 1 amplitude/phase	port 2 amplitude/phase	polarization
1/0°	1/0°	45°
1/0°	1/180°	135°
1/0°	1/90°	LHCP
1/0°	1/-90°	RHCP
1/0°	0/-	Horizontal
0/-	1/0°	Vertical

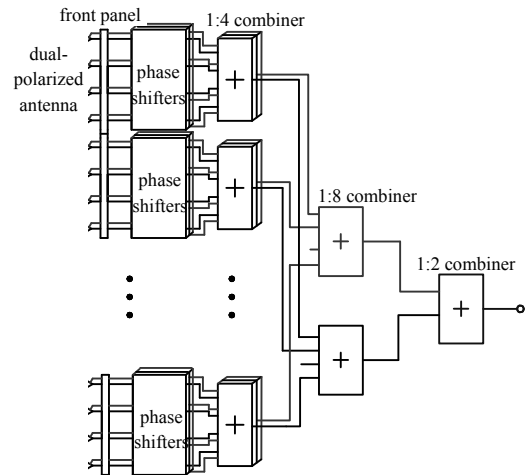


Fig.7 Schematic diagram of the array antenna 图 7 天线阵原理框图

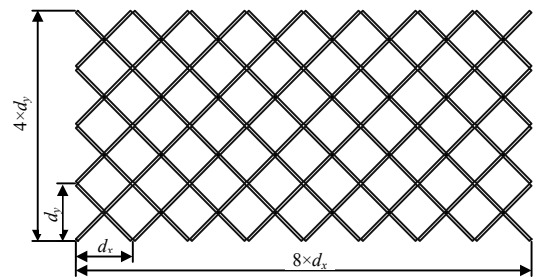


Fig.8 Placement of the antenna element 图 8 阵面排布方式

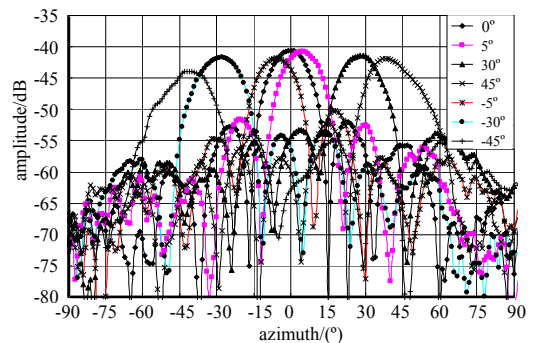


Fig.11 Measured circular polarization radiation pattern of the array at 2f0 in the azimuth 图 11 2f0 圆极化方位面实测波束方向图

原理样机的方向图由天线测试系统 NSI2000 测得，分别测试水平/垂直/斜 45°/斜 135°/左旋/右旋极化共 6 种极化状态形成下的方位面(±45°)和俯仰面(±20°)多波束方向图。限于篇幅，本文给出中心频率 $2f_0$ 圆极化测试方向图，见图 11~图 13，其余测试结果统计详见表 3 和表 4。

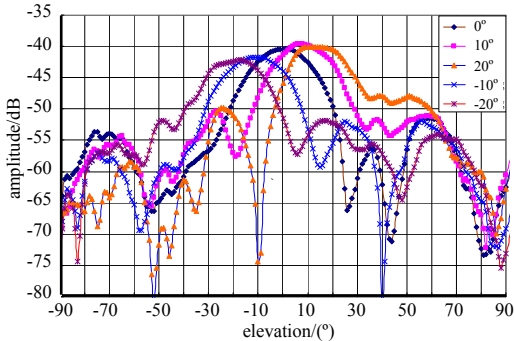


Fig.12 Measured circular polarization radiation pattern of the array at $2f_0$ in the elevation
图 12 $2f_0$ 圆极化俯仰面实测波束方向图

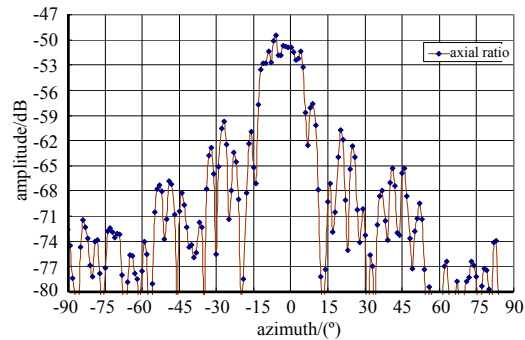


Fig.13 Axial ratio pattern of circular polarization at $2f_0$
图 13 $2f_0$ 圆极化轴比方向图

表 3 方位面扫描方向图主要参数统计
Table3 Statistics of the pattern in the azimuth

frequency	45-polarization				135-polarization				LHCP			
	45° scan beam	30° scan beam	5° scan beam	0° scan beam	45° scan beam	30° scan beam	5° scan beam	0° scan beam	45° scan beam	30° scan beam	5° scan beam	0° scan beam
f_0	30.9	36.0	29.6	30.7	27.3	33.3	24.2	26.8	24.7	31.9	26.8	25.0
$2f_0$	17.9	15.3	14.8	15.1	17.0	13.9	14.0	14.3	17.3	15.4	14.6	14.1
$3f_0$	10.9	12.0	10.7	9.3	9.7	10.6	10.4	10.1	12.4	10.8	9.7	9.5
frequency	RHCP				H-polarization				V-polarization			
	45° scan beam	30° scan beam	5° scan beam	0° scan beam	45° scan beam	30° scan beam	5° scan beam	0° scan beam	45° scan beam	30° scan beam	5° scan beam	0° scan beam
f_0	33.8	27.2	26.7	28.5	30.6	29.9	26.5	27.7	26.6	38.2	32.3	33.9
$2f_0$	19.5	15.6	14.7	15.1	19.2	15.9	14.9	15.1	19.5	13.9	15.7	15.8
$3f_0$	12.0	9.3	10.2	9.5	11.9	11.9	10.2	9.7	10.7	11.4	10.6	10.2

表 4 俯仰面扫描方向图主要参数统计
Table4 Statistics of the pattern in the elevation

frequency	45-polarization			135-polarization			LHCP		
	20° scan beam	10° scan beam	0° scan beam	20° scan beam	10° scan beam	0° scan beam	20° scan beam	10° scan beam	0° scan beam
f_0	40.6	40.4	46.0	42.6	44.0	46.2	38.5	38.5	44.1
$2f_0$	23.4	24.0	28.0	25.2	26.2	30.8	23.5	22.5	24.0
$3f_0$	16.9	14.1	14.8	21.2	16.8	19.0	21.3	18.8	17.5
frequency	RHCP			H-polarization			V-polarization		
	20° scan beam	10° scan beam	0° scan beam	20° scan beam	10° scan beam	0° scan beam	20° scan beam	10° scan beam	0° scan beam
f_0	33.7	33.1	39.7	37.1	36.1	40.8	47.3	51.5	44.1
$2f_0$	22.3	23.9	30.4	23.3	22.8	26.1	32.3	31.6	24.0
$3f_0$	15.7	13.4	19.0	18.7	13.7	17.1	20	18.8	17.5

根据天线阵实测结果，原理样机在 6 种极化状态下的扫描特性满足方位面±45°和俯仰面±20°空域覆盖要求，并且形成圆极化轴比小于 3 dB。

3 结论

本文对宽频带双极化天线单元设计、多极化相控阵天线技术等进行研究，使其具有多极化侦收能力。为今后研制舰载综合射频系统提供设计参考和技术支撑。宽频带宽角多极化相控阵天线技术的研究成果可直接用于大型高增益、低副瓣多极化有源电扫阵列(AESA)的研制，具有广阔的军事应用前景和较高的军事价值。

参考文献：

[1] 刘震国,章文勋. 一种新型正交极化渐变槽线天线[J]. 微波学报, 2008,24(1):42-46. (LIU Zhenguo,ZHANG Wenxun. A novel orthogonally dual-polarized Tapered Slot Antenna[J]. Journal of Microwaves, 2008,24(1):42-46.)

- [2] CHIO Tanhuat,SCHAUBERT D H. Paramter study and design of wide-band widescan dual-polaried Tapered Slot Antenna arrays[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2000,48(6):879–886.
- [3] HOLTER H,CHIO T H,SCHAUBERT D H. Elimination of impedance anomalies in single-and dual-polarized endfire tapered slot phased arrays[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2000,48(1):122–124.
- [4] 梁洪灿,贺友龙,潘伟,等. 宽频带多波束天线阵及其 RCS 的缩减设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2016,14(2): 236–240. (LIANG Hongcan,HE Youlong,PAN Wei,et al. Design of broadband multibeam antenna array and RCS reduction[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2016,14(2):236–240.)
- [5] 胡珺,陈虎,朱瑞平. 一种宽带小型化相控阵天线单元的研究[J]. 现代雷达, 2015,37(1):52–55. (HU Jun,CHEN Hu, ZHU Ruiping. An antenna element for compact wide-band phased array[J]. Modern Radar, 2015,37(1):52–55.)
- [6] 陆娇君,吴鸿超. X 波段超宽角相控阵天线设计[J]. 强激光与粒子束, 2019,31(12):123202-1–123202-5. (LU Jiaojun, WU Hongchao. Deign of X-band ultra-wide angle scanning phased array antenna[J]. High Power Laser And Particle Beams, 2019,31(12):123202-1–123202-5.)
- [7] 王庆业,刘海涛. 相控阵自适应对消技术对抗研究[J]. 舰船电子工程, 2019,39(12):77–81. (WANG Qingye,LIU Haitao. Research on countermeasures of the adaptive cancellation technology of phased array[J]. Ship Electronic Engineering, 2019,39(12):77–81.)
- [8] 李晓今,郭先松,李记任,等. 一种超宽带低交叉极化低剖面相控阵天线单元设计[J]. 电子测量技术, 2019,42(21):5–9. (LI Xiaojin,GUO Xiansong,LI Jiren,et al. Design of an ultra-wideband low cross polarization low profile phased array antenna element[J]. Electronic Measurement Technology, 2019,42(21):5–9.)

(上接第 417 页)

- [9] SUN H,GEYI W. A new rectenna with all-polarization-receiving capability for wireless power transmission[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2015(15):814–817.
- [10] CHOU J H,LIN D B,WENG K L,et al. All polarization receiving rectenna with harmonic rejection property for wireless power transmission[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2014,62(10):5242–5249.
- [11] LOU X,YANG G M. A dual linearly polarized rectenna using defected ground structure for wireless power transmission[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2018,28(9):828–830.
- [12] ZENG Z,CHEN S J,FUMEAUX C. A reconfigurable filter using defected ground structure for wideband common-mode suppression[J]. IEEE Access, 2019(7):36980–36990.
- [13] MA M M,TANG Z X,CAO X,et al. Tri-band cross-coupling bandpass filter with rectangular defected ground structure array[J]. Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 2018,32(11):1409–1415.
- [14] SAHU B,SINGH S,MESHARAM M K,et al. Defected ground structure based compact microstrip lowpass filter with wide stopband[C]// 2017 IEEE Applied Electromagnetics Conference(AEMC). Aurangabad,India:IEEE, 2017:1–2.
- [15] CHEN H J,HUANG T H,CHANG C S,et al. A novel cross-shape DGS applied to design ultra-wide stopband low-pass filters[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2006,16(5):252–254.